



Statuts organique et minéral des sols tropicaux semi-arides cultivés intensivement : cas des arénosols sous cultures maraîchères en zones périurbaines de Dakar au Sénégal

Rachel Obone Ntoma Diallo^{1*}, Fary Diome², Dominique Masse³, Raphaël Sarr¹, Moussa N'dienor⁴, Ambroise Edou-Minko⁵, Frédéric Feder^{6,7}

⁽¹⁾Université Cheick Anta Diop (UCAD). Faculté des Sciences et Techniques. Département de Géologie. BP 5005 Dakar-Fann (Sénégal). rachelntoma@hotmail.com, Tél : 00 221 77 470 32 09

⁽²⁾Université Cheick Anta Diop (UCAD). Institut des Sciences de la Terre (IST). BP 5396, Dakar-Fann (Sénégal)

⁽³⁾Institut de Recherche pour le Développement (IRD) UMR Eco & Sols – Ecologie Fonctionnelle & Biogéochimie des Sols & des Agroécosystèmes. 08 BP3800 Abidjan 08 (Cote d'Ivoire)

⁽⁴⁾Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA). Laboratoire National de Recherches sur les Productions Végétales (LNRPV). Route des Hydrocarbures Bel-Air. BP 3120 Dakar (Sénégal)

⁽⁵⁾Université des Sciences et Techniques de Masuku (USTM). BP 901 Franceville (Gabon)

⁽⁶⁾CIRAD. UPR Recyclage et risque. LMI IESOL. BP 1386, 18524 Dakar (Sénégal)

⁽⁷⁾UMR- Recyclage et Risques, Université de Montpellier. CIRAD. Montpellier (France)

Reçu le 09 août 2020, accepté le 19 août 2020, publié en ligne le 12 septembre 2020

RÉSUMÉ

Description du sujet. En zones urbaines et périurbaines d'Afrique de l'Ouest semi-aride, les cultures maraîchères se pratiquent sur les arénosols du fait des apports répétés d'associations de divers Produits Résiduaux Organiques (PRO). Ainsi, une étude a été réalisée en mars et avril 2019 sur l'application de ces produits en maraîchage.

Objectif. L'objectif de l'étude est d'évaluer l'effet des pratiques d'apports organiques répétés sur l'évolution à long terme de l'état organique et minéral des sols amendés.

Méthodes. Des arénosols ont été prélevés (0 – 20 cm) sous forêt non cultivées (FNC), dans les parcelles maraîchères amendées (PMA) avec les associations de divers PRO et dans les parcelles maraîchères fertilisées (PMF) avec les engrais minéraux de différents âges de mise en culture.

Résultats. Les résultats obtenus ont montré que les diverses associations de PRO appliqués affectent différemment les teneurs en carbone organique ($C_{org.}$) et en azote total ($N_{tot.}$) des PMA. Seules les associations de PRO mêlées à la sciure de bois augmentent les teneurs en $C_{org.}$ et $N_{tot.}$ de 36 % des PMA au-dessus des niveaux des FNC. Ces augmentations dépendent des teneurs en fraction fine (ff, 0-20 μm) des sols. Les PMA du groupe d'arénosols 1 (teneurs en ff < 71 g kg⁻¹) montrent des augmentations de 4 à 56 % par rapport aux FNC. Les PMA du groupe d'arénosols 2 (98 g kg⁻¹ < ff < 250 g.kg⁻¹), ont indiqué des augmentations de 100 à 250 %. Toutes les PMA ont montré des teneurs en phosphore total ($P_{tot.}$) supérieures aux FNC de 180 à 1210 %. Seules les teneurs en $P_{tot.}$ ont évolué avec l'âge de mise en culture des arénosols.

Conclusion. Des essais contrôlés complémentaires sont nécessaires pour confirmer ces résultats. Pour une agriculture intensive durable sur des arénosols conservés, des études ultérieures devraient aider à définir les associations de PRO à appliquer en fonction du type de sol.

Mots-clé : Maraîchage, arénosols, forêt non cultivée, produits résiduaux organiques, Dakar

ABSTRACT

Organic and mineral status of intensively cultivated semi-arid tropical soils: case of arenosols under market gardening in the peri-urban area of Dakar in Senegal

Description of the subject. In urban and peri-urban areas of semi-arid West Africa, market gardening continues to be practiced on arenosols due to the repeated various associations of Organic Waste Products (PRO) application. A study was carried out in March and April 2019.

Objective. Study objective is to assess the long-term effect of repeated organic input practices on amended soils organic and mineral state.

Methods. Arenosols were sampled (0 - 20 cm) under uncultivated forest (FNC), in amended vegetables parcels (PMA) with PRO various associations and in fertilized vegetables parcels (PMF) with fertilizers mineral, of different cultivation ages.

Results. The results show that the diversity of PRO associations applied affects PMA $C_{org.}$ and $N_{tot.}$ contents differently. PRO associations mixed with sawdust Only increase $C_{org.}$ and $N_{tot.}$ content. Of 36% PMA, above FNC contents. These increases depend on soil fine fraction (ff, 0-20 μ m) contents. Arenosol group 1 PMA, at ff <71 g.kg⁻¹, showed 4 to 56 % increases by comparison with FNC content. Arenosols group 2 PMA, with 98 g.kg⁻¹ <ff <250 g.kg⁻¹ showed 100 to 250 % increases. Only $P_{tot.}$ content have evolved with the age of culture.

Conclusion. Further controlled trials are needed to confirm these results. For a sustainable intensive agriculture on conserved arenosols, further studies should help define PRO combinations to apply depending on soil type.

Keyword: Market gardening, arenosols, uncultivated forest, organic waste products, Dakar

1. INTRODUCTION

Les arénosols couvrent 10 % de la surface terrestre (WRB, 2015) dont 51 % en Afrique (Hartemink et Huting, 2008). Leur forte proportion en sables totaux (> 70 %) et leur faible teneur en argiles granulométriques (< 15 %) leur confèrent de faibles teneurs en carbone organique et en éléments minéraux (Calvet, 2003). Malgré ces propriétés médiocres, les arénosols sont de plus en plus exploités pour la production agricole en Afrique (Hartemink et Huting, 2005).

L'entretien et/ou l'amélioration de la fertilité des arénosols en zone sahélienne repose sur la gestion du carbone organique du sol, notamment par application de Produits Résiduels Organiques (PRO) d'origine agricole (fumiers, résidus de récolte et lisiers), urbaine (boues et eaux usées de station d'épuration) et agro-industrielle (déchets d'abattoirs et farine de poissons) (Blanchard *et al.*, 2014). En Afrique de l'Ouest, la production intensive de légumes en agriculture urbaine et périurbaine se caractérise par des applications aux sols d'importantes quantités de divers types de PRO (Kiba *et al.*, 2012 ; Blanchard *et al.*, 2014). Les pratiques de fertilisation organique diffèrent généralement d'une zone maraîchère à une autre et d'un site à un autre au sein d'une même zone (Kiba *et al.*, 2012). Elles sont surtout déterminées par l'identité du site cultivé et par les compétences techniques des agriculteurs (Predotova *et al.*, 2011).

Des études ont démontré que l'épandage sur les sols de grandes quantités de PRO occasionne des augmentations des teneurs en carbone organique ($C_{org.}$) des écosystèmes agricoles à gestion intensive, permettant d'assurer un apport conséquent en éléments nutritifs nécessaires à la croissance des cultures tout en maintenant la qualité de sol (Adhikari et Hartemink, 2017). Durant des décennies, ces augmentations des teneurs en $C_{org.}$ peuvent dépasser celles des sols sous forêts de même typologie (Presley *et al.*, 2004 ; Liao *et al.*, 2014 ; Adhikari K et Hartemink, 2017). Cependant, il est aussi connu que, sur les sols tropicaux de texture grossière, le recyclage à long terme d'importantes quantités de substances organiques

en culture intensive, est considéré comme un haut risque de perte de $C_{org.}$, d'azote et de phosphore à cause des faibles teneurs des sols en fraction fine (ff ; 0-20 μ m). La dynamique du $C_{org.}$ en Afrique de l'Ouest est dépendante des teneurs en fraction fine des sols (Fujisaki *et al.*, 2018), de sorte que des petites variations de texture du sol peuvent avoir des effets significatifs sur le stockage du $C_{org.}$ (Bationo *et al.*, 2001 ; Deckers *et al.*, 2001). Il est connu que les arénosols ont un faible potentiel de stockage du $C_{org.}$ du fait de leurs faibles teneurs en ff (Adhikari et Hartemink, 2017). Pour Six *et al.* (2002), les faibles niveaux en $C_{org.}$ natifs des arénosols reflètent l'équilibre des apports et des pertes de $C_{org.}$ dans les conditions originales (productivité, humidité et température), mais ne représentent pas nécessairement une limite supérieure des stocks de $C_{org.}$ du sol. Par conséquent, les niveaux de carbone natif dans les arénosols ne représentent pas une mesure appropriée de la capacité de stockage ultime du sol (Six *et al.*, 2002).

Au Sénégal, dans la zone des Niayes de la région de Dakar, des parcelles maraîchères sur arénosols à teneurs en ff variables reçoivent des associations de PRO de nature très variable et évolutive (Badiane *et al.*, 2016). Les PRO, peu quantifiés et encore moins qualifiés, sont appliqués à chaque cycle cultural ou après deux cycles culturaux, et rendent possible une agriculture maraîchère intensive sur arénosols depuis plusieurs décennies (N'Dienor, 2014). En effet, les caractéristiques des sols soumis à de telles pratiques de fertilisation organique sont généralement comparées soit aux caractéristiques des sols des systèmes agricoles intensifs à fertilisation minérale, soit aux caractéristiques des sols des systèmes agricoles traditionnels à faibles intrants. En considérant la fréquence d'apports de PRO, les hypothèses suivantes ont été formulées : (i) les teneurs en $C_{org.}$ des PMA sont supérieures à celles des FNC et PMF, (ii) ces teneurs augmentent linéairement avec l'âge de mise en culture intensive des PMA.

L'objectif de l'étude est d'évaluer l'effet des pratiques paysannes d'apports répétés d'associations de diverses PRO sur la qualité des

arénosols amendés en : (i) comparant les statuts organique et minéral des parcelles maraîchères amendées (PMA) avec les PRO, à ceux des arénosols sous forêts non cultivées (FNC), présentant l'état initial des sols avant la mise en culture et celui des parcelles maraîchères fertilisées (PMF) aux engrais minéraux, (ii) déterminant l'évolution à long terme des paramètres pédologiques des PMA, (iii) identifiant le déterminant, à long terme, de stockage du carbone organique exogène apporté dans les PMA entre la fraction fine et l'âge de mise en culture intensive avec apport de PRO.

L'intérêt de cette étude est d'identifier les pratiques paysannes d'apport de PRO qui permettent, à long terme de stocker du C_{org} dans les arénosols cultivés intensivement, tout en améliorant leur statut minéral. Ces pratiques paysannes d'apports organiques pourront être valorisées dans les programmes ultérieurs visant la conservation et la fertilisation optimale des arénosols en zones semi-arides tropicales.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

L'étude a été menée dans la zone des Niayes de la région de Dakar au Sénégal (Fig. 1), plus précisément dans les départements de Guédiawaye, Pikine et Rufisque ($17^{\circ}24'49.30''W$; $17^{\circ}7'25.72''W$), au cours de la période allant du 02 mars au 31 avril 2019. Le climat de la région est de type canarien, caractérisé par l'alternance d'une saison pluvieuse (de juillet à octobre) et d'une saison sèche le reste de l'année. Les précipitations dépassent rarement 500 mm par an et les températures varient de 17 à 31 °C. L'eau disponible dans la région provient essentiellement de la nappe souterraine sub-affleurante à affleurante qui repose sur une loupe d'eau salée, et d'un certain nombre de lacs. Les sols sont développés sur des systèmes dunaires continentaux et littoraux et sur des colluvions sablo-argileuses d'origine calcaire, d'âge quaternaire. La pédologie est composée de sols minéraux bruts d'apports, des sols ferrugineux tropicaux non lessivés, des sols Diors noirs et des sols d'argiles noires tropicales (Maignien, 1959).

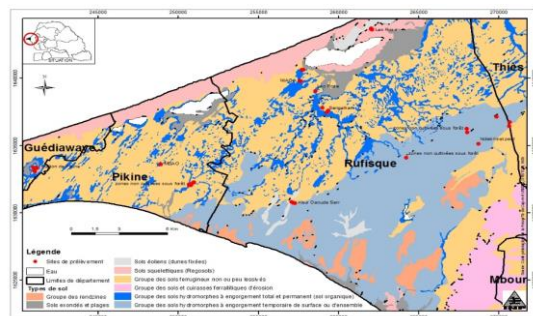


Figure 1. Positionnement des points de prélèvements d'échantillons de sols sur la carte pédologique de la presqu'île du cap vert, modifiée d'après Maignien (1959)

Selon la classification de l'IUSS Working Group WRB (2015), ces sols correspondent respectivement aux arénosols beiges, aux arénosols orthi-ferralique, aux arénosols endo-luviques et aux arénosols endo-calcaire-haplique.

Les sols sous végétation sont occupés par des forêts (forêt classée de Mbao) ou par des exploitations maraîchères. Mise en place depuis 1908, la forêt de Mbao est essentiellement composée d'espèces végétales telles que : *Casuarina equisetifolia* L., *Eucalyptus camadulensis* D., *Prosopis juliflora* Sw, *Anacardium occidentale* L, *Faidherbia albida* Del, *Parinari macrophylla* S., *Adansonia digitata* L., *Maytenus senegalensis* (Lam.) Loes, *Ximenia americana* L., *Eleais guineensis* Jacq. L'activité maraîchère se pratique dans les Niayes de Dakar depuis 1840. Les spéculations dépendent des saisons et se composent principalement de : *Lactuca sativa* L. (Salade), *Allium porum* (Poireau), *Brassica* sp (Choux), *Hibiscus sabdariffa* L. (Oseille de Guinée), *Ipomea batatas* (L.) Lam. (Patates douce), *Mentha* sp (Menthe), *Lycopersicon esculentum* Mill. (Tomates), *Capsicum frutescens* L. (Piments).

Parmi les agriculteurs installés dans la zone, on a noté la présence des petits producteurs traditionnels et des entreprises agro-industrielles. Les petits producteurs traditionnels occupent les parcelles maraîchères de 0,5 à 2,5 hectares, essentiellement fertilisées avec des associations de divers PRO et des fertilisants minéraux (Badiane *et al.*, 2016). Cependant, la fertilisation organique est mal appliquée (Bunwaree, 2000). Divers PRO, non quantifiés ni qualifiés, sont appliqués au sol une à plusieurs fois par cycle cultural, ou après deux cycles culturaux. N'Diénor (2014) estime que la quantité moyenne annuelle de PRO apportée est de 40 t ha⁻¹. L'adoption d'un PRO dépend de son accessibilité, de son coût d'achat, des habitudes de l'agriculteur et de la culture à mettre en place. Les gros producteurs occupent des exploitations agricoles de superficies supérieures à 50 ha (PMF). La gestion de la fertilité des sols des exploitations agro-industrielles est basée sur l'utilisation intensive d'engrais minéraux et de pesticides.

Pour réaliser l'enquête, 36 parcelles ont été identifiées et ces dernières se différenciaient par leur mode d'occupation (cultivée ou non cultivée), la durée de mise en culture et par les pratiques de fertilisation organique ou minérale. On a ainsi distingué les PMA, les PMF et les zones sous forêt non cultivées (FNC). Dans chaque parcelle identifiée, des échantillons de sol ont été prélevés à 0 - 20 cm de profondeur et à partir de trois points de prélèvements, un échantillon composite a été obtenu par parcelle. Les composites ont été séchés à l'air libre pendant quelques jours, puis tamisés à 2 mm. Chaque composite a fait l'objet d'une analyse

granulométrique à cinq fractions par la méthode de la pipette Robinson, après destruction de la matière organique. La teneur en carbone organique a été déterminée par la méthode Walkley et Black (1934). L'azote total a été dosé par la méthode Kjeldahl et la teneur en phosphore total a été mesurée par colorimétrie selon la méthode de Murphey et Riley (1962).

Analyse statistique

Pour évaluer l'effet des apports répétés d'associations de divers PRO sur les propriétés des sols, la relation linéaire entre la teneur en fraction fine et la teneur en $C_{org.}$ a été prise en compte. Dans un premier temps, cette relation a été établie pour les échantillons des sols non cultivés sous forêt. Elle a constitué la référence à partir de laquelle ont été comparées les valeurs obtenues pour les sols des parcelles cultivées. Ces comparaisons se sont appuyées sur des régressions linéaires et cette dernière a permis de tracer l'évolution à long terme des propriétés des PMA. Les données aberrantes ont été identifiées grâce au test de Krubbs et ont été éliminées. Le traitement des données a été réalisé à l'aide du logiciel XLSAT.

3. RÉSULTATS

3.1. Propriétés physicochimiques des arénosols à la profondeur 0 – 20 cm

Les résultats en rapport avec les propriétés physicochimiques des arénosols à la profondeur 0 – 20 cm (les arénosols en situation : forêt non cultivées (FNC), parcelles maraîchères amendées (PMA) avec des Produits Résiduaux Organiques (PRO) et parcelles maraîchères fertilisées (PMF) par des engrais minéraux) sont présentés au tableau 1. Les arénosols beiges et orthi-ferraliques sont très sableux ($\geq 900 \text{ g kg}^{-1}$ de sol) et pauvres en argiles ($< 60 \text{ g kg}^{-1}$ de sol). Leurs teneurs moyennes en carbone organique ($C_{org.}$), azote total ($N_{tot.}$) et phosphore total ($P_{tot.}$) sont respectivement de $6,4 \text{ g kg}^{-1}$, $0,6 \text{ g kg}^{-1}$ et $54,3 \text{ mg kg}^{-1}$ de sol. Les arénosols endo-luviques et endo-calcaire-hapliques sont plus riches en argiles (130 g kg^{-1} de sol) avec des teneurs en sables comprises entre 700 et 900 g kg^{-1} et des teneurs moyennes en $C_{org.}$, $N_{tot.}$ et $P_{tot.}$, respectives de 10 g kg^{-1} , $0,9 \text{ g kg}^{-1}$ et 135 mg kg^{-1} de sol.

Tableau 1. Propriétés physicochimiques des arénosols à la profondeur 0 – 20 cm en situation : forêt non cultivées (FNC), parcelles maraîchères amendées (PMA) avec des Produits Résiduaux Organiques (PRO) et parcelles maraîchères fertilisées (PMF) par des engrais minéraux

Numéro	Localités	Mode d'occupation des sols	Coordonnées géographiques (Degrés décimaux)		Durée de mise en culture (ans)	Produits Résiduaux Organiques appliqués aux sols	g kg ⁻¹ de sol							C/N	mg kg ⁻¹ de sol Phosphore total
			X	Y			A	LF	LG	SF	SG	$C_{org.}$	Azote total		
1	zones non cultivées sous forêt	FNC	-17,2419°	14,45331°	0	SA	12,3	9,3	17,5	585,4	375,5	7,8	0,7	10,2	0,3
2			-17,31298°	14,75302°			21,1	11,1	19,1	569,0	379,7	4,50	0,4	10,9	26,0
3			-17,31366°	14,75255°			44,3	20,1	15,1	490,9	429,6	7,57	0,5	13,0	66,0
4			-17,31467°	14,75108°			54,6	15,2	19,2	510,6	400,4	5,80	0,4	12,8	71,0
5			-17,15547°	14,79048°			84,4	30,6	5,3	602,3	277,4	4,5	0,4	10,9	99,0
6			-17,19026°	14,77060°			122,2	21,4	64,2	406,3	385,9	8,30	0,6	12,0	167,0
7			-17,15508°	14,78795°			124,4	44,2	74,0	512,8	244,6	9,8	0,7	13,2	100,0
8			-17,33266°	14,76478°			188,2	63,2	46,7	664,8	37,1	17,4	1,5	11,1	174,0
9	Keur Daouda Sarr	PMA	-17,25554°	14,73969°	24	Fumier de vache + fumier de volaille + coque d'arachide	103,4	18,8	50,2	479,6	348,0	3,9	0,3	10,0	151,0
10			-17,25448°	14,73945°	24		149,7	28,3	56,5	468,1	297,4	9,1	0,9	9,3	576,0
11			-17,25624°	14,74042°	24		44,4	10,3	23,7	559,3	362,3	5,2	0,4	11,3	156,0
12			-17,25628°	14,7404°	24		21,1	13	16	565,7	384,2	1,3	0,1	8,6	82,0
13	Lac Rose	PMA	-17,24334°	14,81507°	15	Fumier de volaille associée à la sciure	34,0	22,0	34,0	592,4	317,6	4,7	0,4	10,6	193,0
14			-17,21157°	14,85730°	20		53,0	45,8	22,4	482,7	396,1	12,4	1,1	10,6	1065,0
15			-17,21084°	14,85662°	20		141,8	86,9	92,2	81,6	597,5	17,3	2,2	7,8	7127,0
16			-17,21139°	14,85690°	20		49,7	0,0	9,0	481,1	460,2	7,7	0,7	10,8	955,0
17	Mbao	PMA	-17,31586°	14,75093°	10	Fumier de vache	66	50,8	30,5	177,7	675	1,1	0,1	6,4	78,0
19			-17,33225°	14,76477°	10		89,5	26,4	24,4	502,5	357,2	9,9	0,8	11,1	257,0
18			-17,31575°	14,75147°	7	Fumier de mouton + Fumier volaille + Fumier vache	22,1	7,0	14,1	644,6	312,2	5,1	0,5	11,3	123,0
20			-17,2518°	14,82146°	14	Fumier de volaille associée à la sciure de bois	21,6	10,0	79,3	841,5	47,6	2,5	0,2	10,7	448,0
21	Niaga	PMA	-17,25182°	14,82147°	14	Fumier de vache + Fumier de volaille	104,8	40,3	55,2	762,1	37,6	9,3	0,7	12,5	739,0
22			-17,25205°	14,82155°	14		50,7	14	7,6	612,7	315	6,7	0,5	12,4	640,0
23			-17,25234°	14,82179°	54		20,2	5,1	29,3	528,8	416,6	3,4	0,4	8,5	226,0
24			-17,25045°	14,82909°	54		82,2	22,1	38,2	574,7	282,8	7,8	0,7	10,9	819,0
25			-17,25120°	14,82928°	54		28,0	11,0	22,0	622,0	317,0	2,3	0,2	10,4	160,0
26	Pikine	PMA	-17,40611°	14,76179°	54	Fumier de mouton + Fumier de volaille	8,5	10,6	27,6	834,7	118,6	4,99	0,4	10,1	431,0
27			-17,40601°	14,76176°	54	Fumier de cheval	28,2	8,1	249,5	274,6	439,6	5,5	0,6	8,8	477,0
28			-17,40527°	14,75942°	54	Fumier de cheval + quelques résidus de récolte	25,8	5,9	17,6	412,0	538,7	5,4	0,6	8,4	562,0
29			-17,40533°	14,75932°	54	Fumier de cheval associé à la sciure de bois + eaux usées + résidus végétaux	22,3	9,1	149,8	289,4	529,4	10,0	1,0	9,7	988,0
30			-17,40416°	14,76166°	54	Fumier de cheval + Fumier de volaille + Fumier de vache	44,7	3,0	20,9	520,4	411	2,9	0,2	11,1	90,0
31	Sangalka m	PMA	-17,23575°	14,80173°	20		149,3	64,8	73,3	671,8	40,8	8,2	0,7	11,7	403,0
32			-17,23924°	14,80383°	54		163,1	51,3	195,9	357,9	231,8	7,8	0,6	12,1	255,0
33			-17,23653°	14,80074°	20	NPK	48,3	16,1	47,3	473,8	414,5	3,4	0,3	10,2	188,0
34	Ndiekhira t peul	PMA	-17,13063°	14,79516°	12		105,8	26,4	126,2	443,5	298,1	6,3	0,5	10,6	248,0
35			-17,13814°	14,79853°	30		118,7	44,1	64,1	369,7	403,4	4,8	0,5	9,4	130,0
36			-17,13086°	14,79252°	12		124,0	50,4	84,7	427,4	313,5	5,6	0,4	12,1	123,0
37			-17,14842°	14,7805°	10										

Légende : FNC = forêt non cultivée, NPK = Engrais chimique, PMA = Parcelle maraîchère amendée avec des PRO, PMF = Parcelle maraîchère fertilisée avec des engrais chimiques (NPK), PRO = produits résiduaux organiques, SA = Sans apport, STEP = station d'épuration des eaux usées

3.2. Effet d'apports répétés d'association de produits résiduaux organiques sur les teneurs en carbone organique, azote total, phosphore total et les rapports C/N des arénosols

Teneurs en carbone organique

La figure 2 présente les teneurs en carbone organique des sols des FNC, PMA2 et 1, PMF1 et 2.

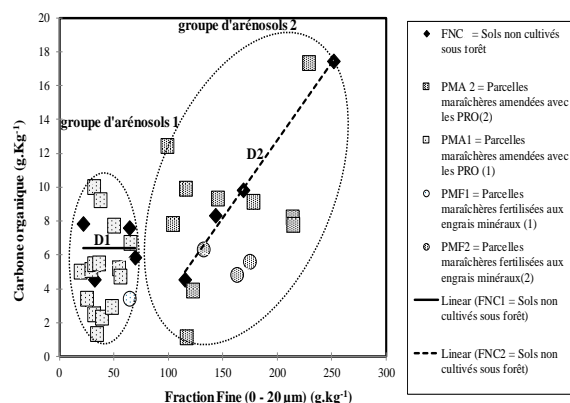


Figure 2. Relation entre teneur en $C_{org.}$ et fraction fine des arénosols sous différents modes d'occupation des sols

Droites de régressions **D1** : $C_{org.}$ vs ff sols FNC (groupe d'arénosols 1)

$$Y1 = -0,0005x + 6,4391 ; p = 0,993$$

D2 : $C_{org.}$ vs ff sols FNC (groupe d'arénosols 2)

$$Y2 = 0,0918x - 5,686 ; p = 0,004$$

Les teneurs en $C_{org.}$ de l'ensemble des échantillons de sols variaient de 1,1 à 17,4 g kg⁻¹ de sol pour un gradient de teneurs en ff qui variait de 19,1 à 251,4 g kg⁻¹ de sol (Figure 2). Deux groupes d'échantillons se distinguaient parmi les sols des FNC autour d'un seuil établi à 71 g kg⁻¹ de ff de sol. Au-dessous de cette valeur seuil, les sols des FNC ne présentaient pas de relation linéaire entre teneur en $C_{org.}$ et ff (D1). La teneur moyenne en $C_{org.}$ des sols des FNC était de $6,4 \pm 1,5$ g kg⁻¹ de sol. Au-delà de ce seuil de teneur en ff, la relation entre teneur en $C_{org.}$ et teneur en ff était linéairement positive (D2). Dans le groupe d'arénosols 1 (Figure 2), formé d'échantillons de sols à teneurs en ff inférieures à 71 g kg⁻¹ de sol pour des teneurs en $C_{org.}$ allant de 1,10 à 10 g kg⁻¹ de sol, 25 % des PMA ont présenté des teneurs en $C_{org.}$ supérieures à la teneur moyenne des FNC ($6,43 \pm 1,56$ g kg⁻¹ de sol). Ces teneurs étaient toutefois faibles (6,8 à 10 g kg⁻¹ de sol) et 75 % des PMA ont présenté des teneurs en $C_{org.}$ inférieures à la valeur moyenne de référence sous forêt ($6,43 \pm 1,56$ g kg⁻¹ de sol) et montraient des teneurs en $C_{org.}$ de 1,1 à 5,6 g kg⁻¹ de sol. Dans le groupe d'arénosols 2, constitué d'échantillons de sols à teneurs en ff comprises entre 100 et 251,4 g kg⁻¹ de sol pour des teneurs en $C_{org.}$ allant de 3,9 à 17,4 g kg⁻¹ de sol, 66,0 % des

PMA ont présenté des teneurs en $C_{org.}$ supérieures à la teneur moyenne des FNC ($11,2 \pm 5,1$ g kg⁻¹ de sol). Ces teneurs en $C_{org.}$ variaient de 7,8 à 17,3 g kg⁻¹ de sol. En revanche, 34,0 % de PMA ont montré des teneurs en $C_{org.}$ inférieures au niveau de référence des sols des FNC présentant des teneurs en $C_{org.}$ de 3,9 à 9,1 g.kg⁻¹ de sol. Toutes les PMF ont montré des teneurs en $C_{org.}$ inférieures à celles des PMA et des FNC dans les deux groupes d'arénosols (Figure 2).

Teneurs en azote total

La relation entre la teneur en azote total et la fraction fine des arénosols sous différents modes d'occupation est présentée à la figure 3.

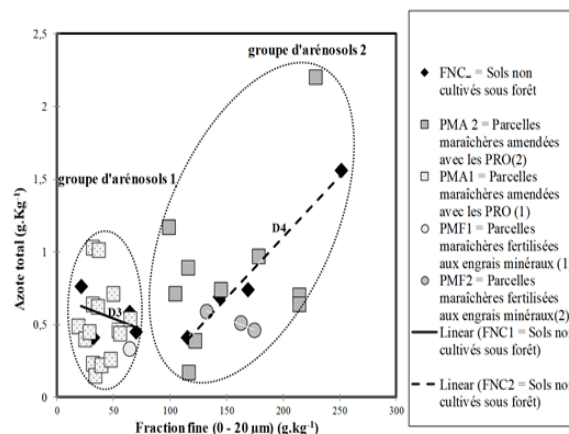


Figure 3. Relation entre teneur en azote total et fraction fine des arénosols sous différents modes d'occupation

Droites de régressions **D3** : $N_{tot.}$ vs ff sols FNC (groupe d'arénosols 1)

$$Y3 = -0,003x + 0,69 ; p = 0,552$$

D4 : $N_{tot.}$ vs ff sols FNC (groupe d'arénosols 2)

$$Y4 = 0,0083x - 0,5658 ; p = 0,010$$

Du fait de la forte corrélation entre les teneurs en $N_{tot.}$ et en $C_{org.}$ des sols, les teneurs en $N_{tot.}$ présentent une relation similaire à celle du $C_{org.}$ avec les teneurs en ff (Figure 3). Deux groupes de sols se distinguaient selon cette teneur en ff et dans le groupe d'arénosols 1, les teneurs en $N_{tot.}$ de l'ensemble des échantillons de sols variaient de 0,2 à 1,0 g kg⁻¹ de sol. Les teneurs en $N_{tot.}$ des sols des FNC ne présentaient pas de relation linéaire avec les teneurs en ff (D3). La teneur moyenne en $N_{tot.}$ des sols des FNC s'établissait autour de $0,6 \pm 0,1$ g kg⁻¹ de sol. Les PMA ont indiqué des teneurs en $N_{tot.}$ qui allaient de 0,7 à 1,0 g kg⁻¹ de sol. Comparativement aux variations des teneurs en $C_{org.}$, 25,0 % des PMA ont montré des teneurs en $N_{tot.}$ supérieures à la teneur moyenne des sols des FNC.

Dans le groupe d'arénosols 2, les teneurs en $N_{tot.}$ des sols des FNC présentaient une relation linéaire avec les teneurs en ff (Tableau 2 : D4). Les teneurs

en $N_{tot.}$ de l'ensemble des échantillons des sols du groupe variaient de 0,4 à 2,2 g kg⁻¹ de sol. La teneur moyenne en $N_{tot.}$ des FNC était estimée à $0,7 \pm 0,2$ g kg⁻¹. Similairement au $C_{org.}$, 66,0 % des PMA ont montré des teneurs en $N_{tot.}$ supérieures à la teneur de référence des FNC, avec des valeurs de 0,7 à 2,2 g kg⁻¹ de sol. Les teneurs en $N_{tot.}$ des sols des PMF, pour les deux groupes d'arénosols, étaient inférieures à la teneur moyenne des sols des FNC et des PMA.

Tableau 2. Équations des droites de régression des différents paramètres des arénosols des groupes 1 et 2.

Droites de régression	Equations droites	des	p-value
D1 : $C_{org.}$ vs ff sols FNC (groupe d'arénosols 1)	$y1 = -0,0005x + 6,4391$		$p = 0,993$
D2 : $C_{org.}$ vs ff sols FNC (groupe d'arénosols 2)	$y2 = 0,0918x - 5,686$		$p = 0,004$
D3 : $N_{tot.}$ vs ff sols FNC (groupe d'arénosols 1)	$y3 = -0,003x + 0,69$		$p = 0,552$
D4 : $N_{tot.}$ vs ff sols FNC (groupe d'arénosols 2)	$y4 = 0,0083x - 0,5658$		$p = 0,010$
D5 : C/N vs ff (groupe d'arénosols 1)	$y5 = 0,058x + 9,0693$		$p = 0,010$
D6 : C/N vs ff (groupe d'arénosols 2)	$y6 = -0,0015x + 12,111$		$p = 0,914$
D7 : $P_{tot.}$ vs ff	$y7 = 0,7082x + 11,201$		$p = 0,002$

Rapports C/N

Les résultats sur le C/N sont présentés à la figure 4.

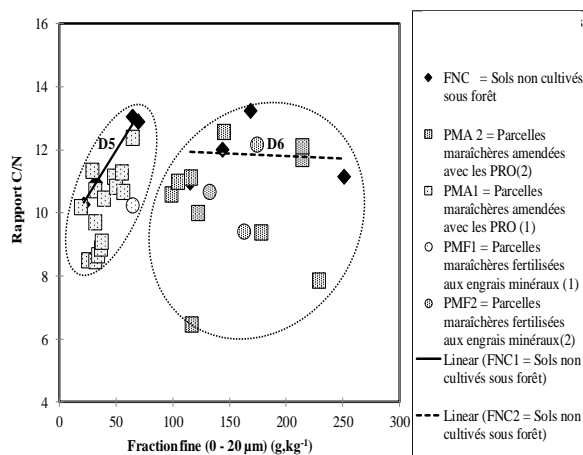


Figure 4. Relation entre rapport C/N et fraction fine des arénosols sous différents modes d'occupation

Droites de régressions **D5** : C/N vs ff sols FNC (groupe d'arénosols 1)

$$Y5 = 0,058x + 9,0693 ; p = 0,010$$

D6 : C/N vs ff sols FNC (groupe d'arénosols 2)

$$Y6 = -0,0015x + 12,111 ; p = 0,002$$

Les teneurs en ff confirment les deux groupes d'arénosols précédemment distingués. Dans le groupe d'arénosols 1, les rapports C/N des sols des FNC ont évolué de 10,3 à 13,0 avec un rapport moyen de $11,8 \pm 1,3$, alors que ceux des PMA ont évolué de 8,5 à 12,4. Une relation linéaire positive a

été observée entre les rapports C/N des sols des FNC et les teneurs en ff (Figure 4). Dans le groupe d'arénosols 2, les rapports C/N des sols des FNC ont évolué de 11,0 à 13,2 avec un rapport moyen de $11,9 \pm 1$. Les rapports C/N des PMA de ce groupe ont varié de 6,5 à 12,6. Il n'a pas été observé de relation entre les rapports C/N des sols des FNC et les teneurs en ff (Figure 4). La quasi-totalité des PMA ont montré des rapports C/N inférieurs au rapport C/N moyen des sols des FNC dans les deux groupes d'arénosols (Figure 4). L'écart des rapports C/N des sols des parcelles cultivées par rapport à la droite de référence était de -1,2. Cet écart moyen était significativement différent de 0 ($p = 0,003$) indiquant une diminution du rapport C/N dans les sols des parcelles cultivées par comparaison avec les sols des FNC.

Teneurs en phosphore total

Les teneurs en phosphore total des FNC, PMA 1 et 2, PMF1 et 2 sont indiquées à la figure 5.

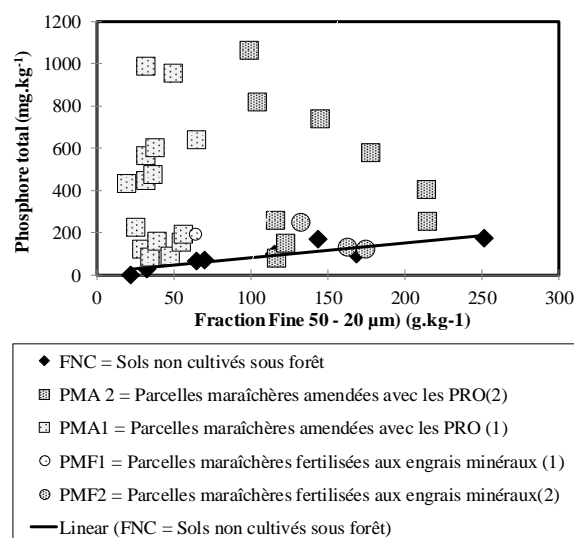


Figure 5. Relation entre teneur en phosphore total et fraction fine des arénosols sous différents modes d'occupation

Droites de régressions **D7** : $C P_{tot.}$ vs ff sols FNC (groupe d'arénosols 1 et 2)

$$Y7 = 0,7082x + 11,201 ; p = 0,002$$

Une relation positive hautement significative ($p = 0,002$) a été observée entre les teneurs en $P_{tot.}$ et la ff des sols des FNC dans les deux groupes d'arénosols donnant lieu à une droite de régression unique D7 (Figure 5). La teneur moyenne en $P_{tot.}$ des sols des FNC a été évaluée à $88 \pm 61,1$ mg kg⁻¹. Toutes les parcelles maraîchères ont montré des teneurs en $P_{tot.}$ supérieures à celles des sols des FNC affichant des valeurs qui variaient de 163,0 à 1065,0 mg kg⁻¹ de sol (Figure 5).

3.2. Évolution à long terme des teneurs en carbone organique, azote total, phosphore total

et rapports C/N des arénosols des parcelles maraîchères amendées avec les associations de produits résiduaux organiques

Groupe d'arénosols 1

La figure 6 présente la relation entre les teneurs en (a) $C_{org.}$, (b) $N_{tot.}$, (c) C/N, (d) $P_{tot.}$ et la durée de mise en culture maraîchère des arénosols du groupe 1 avec apport d'associations de divers PRO.

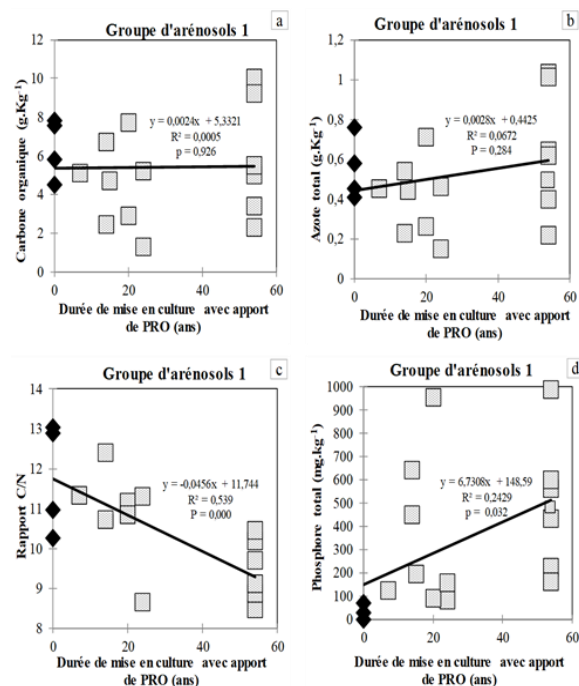


Figure 6. Relation entre teneurs en (a) $C_{org.}$, (b) $N_{tot.}$, (c) C/N, (d) $P_{tot.}$ et la durée de mise en culture maraîchère des arénosols du groupe 1 avec apport d'associations de divers PRO

Dans le groupe d'arénosols 1 (Figure 6), la relation entre teneur en $C_{org.}$ des sols des PMA et la durée de mise en culture maraîchère n'était pas significative ($p = 0,926$) (Figure 6a). La teneur moyenne en $C_{org.}$ des sols des FNC ($6,4 \pm 1,5$ g kg^{-1} de sol) n'était pas significativement différente de celles des sols des PMA de 7 à 24 ans ($4,1 \pm 2,3$ g kg^{-1} de sol) ni de celles des sols des PMA de 54 ans ($5,8 \pm 2,7$ g kg^{-1} de sol) de mise en culture maraîchère intensive.

L'évolution des teneurs en $N_{tot.}$ au cours de la durée de mise en culture suivait la même tendance (Figure 6b). Aucune relation significative n'a été observée entre les teneurs en $N_{tot.}$ et la durée de mise en culture ($p = 0,284$). Les teneurs en $N_{tot.}$ des sols des PMA du groupe d'arénosols 1 restaient faibles dans l'ensemble (≤ 1 g kg^{-1} de sol).

Toutefois, une relation négative hautement significative ($p = 0,000$) était observée entre les rapports C/N et la durée de mise en culture maraîchère intensive (Figure 6c). Le rapport C/N moyen des sols des FNC (12 ± 2) était significativement plus faible que celui des sols des

PMA de 54 ans ($9,6 \pm 1$). Une relation significativement positive a été aussi observée entre les teneurs en $P_{tot.}$ et la durée de mise en culture maraîchère intensive ($p = 0,032$). La teneur moyenne en $P_{tot.}$ des sols des FNC (54 ± 24 mg kg^{-1} de sol) était inférieure à celle des sols des PMA de 7 à 24 ans ($226,0 \pm 199,0$ mg kg^{-1} de sol) qui restait inférieure à celle des sols des PMA de 54 ans ($410,0 \pm 171,0$ mg kg^{-1} de sol) (Figure 6d).

Groupe d'arénosols 2

La relation entre les teneurs en (e) $C_{org.}$, (f) $N_{tot.}$, (g) C/N, (h) $P_{tot.}$ et la durée de mise en culture maraîchère des arénosols du groupe 2 avec apport de PRO est indiquée à la figure 7.

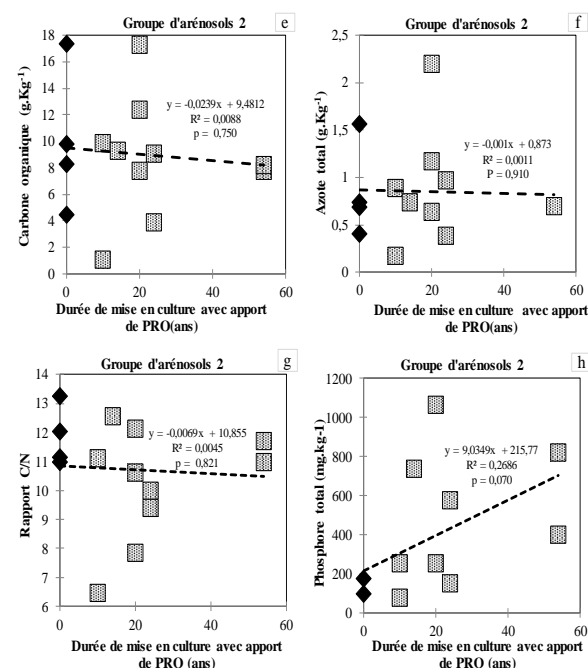


Figure 7. Relation entre teneurs en (e) $C_{org.}$, (f) $N_{tot.}$, (g) C/N, (h) $P_{tot.}$ et la durée de mise en culture maraîchère des arénosols du groupe 2 avec apport de PRO

Dans le groupe d'arénosols 2 (Figure 7), la relation entre la teneur en $C_{org.}$ et la durée de mise en culture n'était pas significative ($p = 0,750$) (Figure 4a). La teneur moyenne des sols des FNC ($11,2 \pm 5,4$ g kg^{-1} de sol) n'était pas significativement différente de celle des sols des PMA de 10 à 24 ans ($10 \pm 4,1$ g kg^{-1} de sol) ni de 54 ans de mise en culture intensive ($8,0 \pm 0,3$ g kg^{-1} de sol) (Figure 4a). L'évolution des teneurs en $N_{tot.}$ au cours de la durée de mise en culture maraîchère a été semblable à celle des teneurs en $C_{org.}$: aucune relation significative n'a été observée ($p = 0,910$) (Figure 7b). La teneur moyenne en $N_{tot.}$ des sols des FNC ($0,8 \pm 0,4$ g kg^{-1} de sol) et celles des sols des PMA de 10 à 24 ans ($0,8 \pm 0,6$ g kg^{-1}) ainsi que de 54 ans de mise en culture ($0,8 \pm 0,6$ g kg^{-1}) n'étaient pas significativement différentes (Figure 7b).

Aucune relation significative ($p = 0,821$) n'a été observée entre les rapports C/N et la durée de mise en culture (Figure 7c). Par contre, une relation linéaire positive faiblement significative ($p = 0,07$) était observée entre les teneurs en P_{tot} des sols des PMA et la durée de mise en culture intensive (Figure 7d). La teneur moyenne en P_{tot} des sols des FNC ($171,8 \pm 89 \text{ g kg}^{-1}$ de sol) était inférieure à celle des sols des PMA de 10 à 24 ans ($507,0 \pm 310,0 \text{ g kg}^{-1}$ de sol), elle-même inférieure à la teneur moyenne des sols des PMA de 54 ans ($611 \pm 294 \text{ g kg}^{-1}$ de sol).

3.3. Déterminants du stockage à long terme du carbone organique entre la fraction fine et la durée de mise en culture dans les arénosols des parcelles maraîchères amendées

La figure 8 indique l'écart entre la teneur en C_{org} des parcelles maraîchères amendées (PMA) par rapport à la teneur en C_{org} des sols de référence sous forêt non cultivée (FNC).

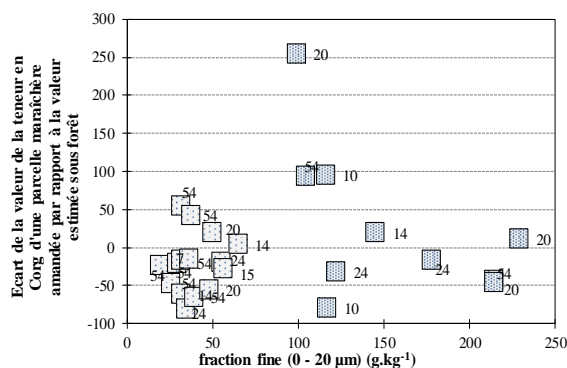


Figure 8. Écart entre la teneur en C_{org} des parcelles maraîchères amendées (PMA) par rapport à la teneur en C_{org} des sols de référence sous forêt non cultivée (FNC), en fonction de la teneur en fraction fine (ff) = argiles + limons fins, exprimé en pourcentage de la valeur de référence. La teneur en C_{org} des sols des FNC est calculée selon le modèle suivant : (i) si argiles + limons fins $< 71 \text{ g kg}^{-1}$ alors $C_{org} = 6,4$, (ii) si argiles + limons fins $> 70 \text{ g kg}^{-1}$ alors $C_{org} = 0,0918 (\text{argiles} + \text{limons fins}) - 5,5573$. Les étiquettes représentent la durée de la mise en culture maraîchère avec apport de PRO, après défriche.

Aucune relation n'a été observée entre, d'une part l'écart de la teneur en C_{org} des PMA et les teneurs en ff des sols et d'autre part, l'écart de la teneur en C_{org} des PMA et la durée de mise en culture, dans les deux groupes d'arénosols (Figure 8). Les valeurs des teneurs en C_{org} des sols des PMA étaient réparties indifféremment de part et d'autre de la droite $x = 0$ formée par les teneurs en C_{org} des sols des FNC, traduisant l'état initial des sols avant la mise en culture maraîchère. Au total, 36 % des PMA, des deux groupes de sols, étaient situées au-dessus de cette droite présentant des écarts positifs en C_{org} . Parmi elles, les PMA du groupe d'arénosols 2 montraient les écarts positifs en C_{org} .

les plus élevés, allant de 100 à 150 % voire 250 % de la teneur en C_{org} des sols des FNC. Celles du groupe d'arénosols 1 montraient les écarts positifs en C_{org} les plus modestes entre 4 % et 56 % de la teneur en C_{org} des sols des FNC. Parmi les 64 % des PMA situées en dessous de la droite $x = 0$, celles appartenant au groupe d'arénosols 1 ont montré les écarts négatifs en C_{org} les plus bas, inférieurs à -50 % du niveau en C_{org} des sols des FNC.

4. DISCUSSION

4.1. Importance d'une classification texturale des arénosols selon la relation carbone organique versus fraction fine

Dans la zone semi-aride de l'Afrique de l'Ouest, plusieurs études ont montré le rôle important de la ff sur le stockage et la dynamique du C_{org} dans les horizons de surface des sols (Fujisaki *et al.*, 2018). En effet, des petites variations de texture dans cet horizon peuvent avoir des effets importants sur le stock de C_{org} du sol (Bationo et Buerkert, 2001). Dans cette étude, les arénosols ont été classés en deux groupes selon la relation C_{org} versus ff dans les sols des FNC (Figure 2a). La distinction texturale entre ces deux groupes d'arénosols induit plusieurs conséquences. Premièrement, les résultats de l'étude montrent que cette relation ne semble pas se vérifier pour le groupe d'arénosols 1 à très faibles teneurs en ff ($p = 0,993$), mais se vérifie pour le groupe 2 aux teneurs en ff supérieures à 100 g kg^{-1} de sol ($p = 0,004$) (Figure 2). Cela indiquerait que la ff n'est pas un déterminant de stockage du C_{org} dans les arénosols du groupe 1, mais uniquement dans le groupe 2. Deuxièmement, la teneur moyenne des sols des FNC du groupe 1 ($6,43 \text{ g kg}^{-1}$ du sol) est significativement inférieure ($p = 0,034$) à celle du groupe 2 ($11,2 \text{ g kg}^{-1}$ du sol). Or, les pratiques de gestion qui maintiennent ou améliorent le C_{org} dépendent notamment de la teneur initiale en C_{org} (N'Dayegamiye et Drapeau, 2009). Troisièmement, d'après Deckers *et al.* (2001), les sols du groupe d'arénosols 2 ont des teneurs en C_{org} plus élevées que celles du groupe 1 lorsqu'ils ont reçu des apports similaires de PRO. La différence résulterait de la plus grande protection physique de la matière organique du sol, dans le groupe 2, par la ff dont la teneur est plus importante (Hassink, 1997). En revanche, la minéralisation du C_{org} est plus rapide dans le groupe 1 à cause de leur texture plus grossière.

La séparation des arénosols en deux groupes s'approche de la différenciation faite dans le diagramme de texture de la classification des sols de l'USDA (USDA NRCS, 2010) entre la texture sablo-limoneuse (70 à 85 % de sables) et sableuse ($> 85 \%$). Ainsi, les deux groupes d'arénosols doivent être considérés comme des typologies

pédologiques différentes. En Afrique de l'Ouest, des études (Blanchard *et al.*, 2014) proposent de reformuler les doses d'apports de PRO en fonction de la teneur en ff des sols, afin de compenser, de façon efficiente, la minéralisation de la matière organique de chaque type de sol. Jusqu'à ce jour, les fiches techniques recommandent un apport unique pour tous types de sols dans la zone d'étude.

4.2. Effets d'apports répétés d'association de divers produits résiduels organiques sur les teneurs en carbone organique, azote total, et phosphore total des arénosols sous culture maraîchère intensive

En conditions pédoclimatiques semi-arides, la culture intensive, la répétition d'apports et l'association de PRO biochimiquement hétérogènes sont connus pour accélérer la minéralisation du $C_{org.}$ des sols (De Nobili *et al.*, 2001; Fontaine *et al.*, 2004). Les sols des FNC de même nature présentent généralement des teneurs en $C_{org.}$ plus élevées que les sols sous culture intensive (Murty *et al.*, 2002). Au cours de cette étude, 64 % des PMA ont montré des niveaux en $C_{org.}$ inférieurs aux teneurs moyennes des sols des FNC pour les deux groupes d'arénosols. Cependant, les apports répétés d'association de divers PRO ont permis d'augmenter des teneurs en $C_{org.}$ des arénosols dans 36 % des PMA. Les augmentations en $C_{org.}$ sont tributaires des teneurs en ff des sols et vont de 4 à 56 % dans les sols des PMA du groupe 1 et de 100 à 250 % dans les sols des PMA du groupe 2. Ces gains restent certes modestes dans les deux groupes d'arénosols ($\leq 20 \text{ g kg}^{-1}$ de sol), mais ils sont à considérer et à valoriser tant il est difficile de maintenir ou d'augmenter les teneurs en $C_{org.}$ des sols bien aérés sous cultures intensives en région chaude semi-aride, suite à la perte rapide des matières organiques ajoutées (Bot et Benites, 2005).

La distribution géographique des PMA à écarts positifs en $C_{org.}$ fait apparaître un effet « localité » en lien avec la composition des PRO associés (Tableau 1). La quasi-totalité de ces parcelles maraîchères sont localisées dans les Bassins maraîchers de Pikine, Niaga et du lac Rose. Les PMA de Pikine sont situés à proximité d'une station d'épuration des eaux usées. Elles reçoivent du fumier de cheval associé à de la sciure de bois et sont abondamment arrosées d'eaux usées de la station d'épuration (Tableau 1), riches en $C_{org.}$. Ces sites restent verdoyants toute l'année et la biomasse végétale participe certainement aussi à enrichir les sols en $C_{org.}$. Les sols des parcelles maraîchères localisées dans le secteur de Niaga et le long du lac Rose reçoivent du fumier de volaille associé à de la sciure de bois fabriqué in situ. Des études ont démontré que dans les sols pauvres en $C_{org.}$, malgré leur décomposition rapide, des gains nets en $C_{org.}$ sont généralement obtenus lors de l'incorporation

de matière organique exogène riche en lignine difficilement décomposable qui stabilise la matière organique du sol (Fontaine *et al.*, 2003). Les écarts positifs en $C_{org.}$ les plus élevés (116 à 255 %) sont observés dans les parcelles maraîchères basées sur certains sols autour du lac Rose. La présence de carbonates issus des coquilles marines en décomposition pourrait participer sur le long terme à l'enrichissement de ces sols en $C_{org.}$.

En effet, les parcelles maraîchères à écarts positifs en $C_{org.}$ ayant reçu des associations identiques de PRO, ont présenté des teneurs en $C_{org.}$ hétérogènes (Tableau 1 et Figure 7). Cela indique un effet dose d'apport de chaque PRO en association (N'Dienor, 2014) qui peut se superposer à un effet fréquence d'apport (Mbaye et Moustier, 2000). Hodomihou *et al.* (2011) ont mis en évidence des teneurs en $C_{org.}$ différentes dans deux parcelles maraîchères de la zone d'étude ayant reçu une association identique de PRO mais à des doses différentes. Des fortes doses d'apports ont induits des teneurs élevées en $C_{org.}$. D'après N'Dienor (2014), les apports de PRO sont effectués soit à chaque cycle, soit après deux cycles voire plusieurs fois par cycle de culture. Or, il a été démontré que lorsque la fréquence d'apport est supérieure à la vitesse de décomposition des substances organiques appliquées, les sols stockent du $C_{org.}$ (Cotrufo *et al.*, 2013). On peut donc supposer que les sols des PMA qui montrent des teneurs en $C_{org.}$ supérieures aux sols des FNC ont reçu plus fréquemment d'importantes doses de PRO riches en lignine.

La gestion de l'azote et du phosphore dans les systèmes maraîchers intensifs de la zone d'étude demeure cruciale tant que les sols en sont appauvris. En culture, la nutrition de la plante repose en partie sur la minéralisation du stock organique du sol même dans les parcelles fertilisées sans PRO (Niane-Badiane *et al.*, 1999). Les PRO des Niayes sont d'importantes sources de $N_{tot.}$ et de $P_{tot.}$ (N'Dienor, 2014), leur application répétée au sol devrait induire des valeurs élevées dans les sols des PMA (Azeez et Van., 2010). Cependant, seules les PMA à écarts positifs en $C_{org.}$ sont excédentaires en $N_{tot.}$ (Figure 3), mais ces teneurs restent très faibles ($< 2,5 \text{ g kg}^{-1}$ de sol) et demeurent dans la gamme des valeurs observées dans les sols cultivés de la zone sans apports importants de PRO. Il a été démontré que l'application de PRO en quantités supérieures à la capacité de prélèvement par les plantes favorise la lixiviation des nitrates, surtout dans les sols à texture grossière (Stumpe et Vlek, 1991). Mais l'application de PRO riches en lignine, qui minéralise lentement l'azote organique, réduit la lixiviation et enrichit le sol en $N_{tot.}$ (Shaddox et Sartain, 2001).

Les teneurs en $P_{tot.}$ sont excédentaires pour l'ensemble des sols des PMA des deux groupes d'arénosols (Figure 4). Cela suggère que le

phosphore est principalement d'origine organique. Les valeurs très élevées constatées (20 à 90 % des teneurs initiales) sont indubitablement liées à l'application excessive de PRO (Kiba *et al.*, 2012). Le phosphore est plus susceptible de s'accumuler que l'azote dans les sols cultivés. Certaines études sur les bilans nutritifs au Sahel ont indiqué que le phosphore était considéré comme immobile dans le sol (Predotova *et al.*, 2011) car formant rapidement des complexes avec la ff, le fer, le calcium et le magnésium (Kiba *et al.*, 2012). Les PMA à très fortes teneurs en P_{tot} sont localisées dans la zone du lac Rose. Des études menées aux États-Unis et en Europe ont montré une accumulation de P_{tot} du sol à des valeurs très élevées lorsque les fumiers sont épandus uniquement sur la base des besoins en N en raison du rapport P/N relativement élevé dans le fumier par rapport au P (Sharpley *et al.*, 1993). Une accumulation excessive de P dans les sols constitue une menace potentielle puisqu'ils peuvent être perdus dans l'environnement (Kiba *et al.*, 2012).

4.3. Évolution à long terme des teneurs en carbone organique, azote total et phosphore total des arénosols des parcelles maraîchères amendées avec des associations de divers produits résiduels organiques

Les études sur les effets des PRO à long terme sont extrêmement utiles et nécessitent des expériences de terrain avec des parcelles permanentes qui permettent de quantifier l'évolution des propriétés des sols pendant plusieurs décennies (Müller *et al.*, 2011). Les observations sont importantes pour la stabilité et la productivité à long terme des agroécosystèmes. Les évolutions à long terme des teneurs en $C_{org.}$, $N_{tot.}$ et $P_{tot.}$ des PMA semblent similaires dans les deux groupes d'arénosols (Figure 6 et 7). Contrairement à l'évolution des teneurs en $P_{tot.}$, celles des teneurs en $C_{org.}$ et en $N_{tot.}$ au cours de la durée de mise en culture maraîchère intensive n'ont pas produit de tendances nettes dans les sols (Figure 6 et 7). Aucune relation significative n'a été observée entre les teneurs en $C_{org.}$ et $N_{tot.}$ et la durée de mise en culture intensive des sols dans les deux groupes de sols. Il est connu que l'application répétée de PRO enrichit le sol en $C_{org.}$ labile et en N minéralisable (Mallory et Griffin., 2007). Les conditions pédoclimatiques en milieu semi-aride et la culture intensive favorisent et accélèrent la perte de $C_{org.}$ et de N dont les cycles sont étroitement couplés dans le sol (Chantigny *et al.*, 2001; Fujisaki *et al.*, 2018). Les pertes annuelles en $C_{org.}$ occasionnées par la culture continue dans la zone d'étude ont été évaluées de 2 à 4 % selon la teneur en ff des sols par les études antérieures. Ces pertes entraînent une diminution de la teneur en $C_{org.}$ qui approche un nouvel équilibre après 30 à 50 ans de mise en culture. Sleutel *et al.* (2006) ont montré qu'à l'échelle de plusieurs décennies, dans les sols arables qui reçoivent de

grandes quantités de PRO, le $C_{org.}$ est moins stabilisé, soit par association avec la ff, soit par sa récalcitrance biochimique intrinsèque. L'évolution à long terme des teneurs en $C_{org.}$ et $N_{tot.}$ est affectée par la diversité (nature, dose et fréquence d'apports) d'associations de PRO.

Malgré la diversité des PRO appliqués, des relations positives hautement significatives dans le groupe 1 ($p = 0,032$) et faiblement significatives dans le groupe 2 ($p = 0,07$) ont été observées entre les teneurs en $P_{tot.}$ et la durée de mise en culture (Figure 6d et 7h). Dans les deux groupes, les teneurs en $P_{tot.}$ des sols des PMA sont deux fois plus élevées que celles des sols de FNC après 54 ans d'apports de PRO. Ces résultats correspondent à ceux obtenus dans une étude sur les sols de l'Utah avec une large gamme d'histoires d'épandage de PRO (Franks, 2000). Les concentrations de $P_{tot.}$ ont augmenté de 1,5 à 2,5 fois au-dessus des niveaux de fond avec des applications de fumier pendant 2 à 4 décennies. D'après les résultats de cette étude, l'évolution à long terme des teneurs en $P_{tot.}$ des sols des PMA ne dépend pas de la texture du sol, mais plutôt des pratiques d'apports (composition, dose et fréquence d'apport de PRO) (Fujisaki *et al.*, 2018). Face à l'accumulation du $P_{tot.}$ sur le long terme, des politiques appropriées devraient être envisagées pour diminuer le P dans les sols maraîchers de la zone des Niayes. La rotation des cultures avec un retrait élevé de P est l'une des stratégies recommandées pour épuiser les sols riches en P et réduire les risques de perte de P (Eigenberg *et al.*, 2009).

5. CONCLUSION

Des stratégies de stockage du $C_{org.}$ à long terme qui améliorent également la fertilité des sols sont recherchées pour contrer les effets des niveaux croissants de CO_2 atmosphérique, comme le souligne l'initiative 4p1000. Avec l'augmentation des populations, les pressions environnementales et le changement climatique, les arénosols peuvent être utilisés pour la conception des programmes visant à atténuer les contraintes liées à la production agricole. L'étude a évalué les pratiques paysannes d'apports répétés d'association de divers PRO sur l'évolution des teneurs en $C_{org.}$, $N_{tot.}$, $P_{tot.}$ et des rapports C/N des arénosols sous culture maraîchère intensive.

Les résultats obtenus ont montré que la diversité des associations de PRO appliquées affecte différemment les teneurs en $C_{org.}$ et $N_{tot.}$ des sols amendés. Seules les associations de PRO mêlées à la sciure de bois augmentent les teneurs en $C_{org.}$ et $N_{tot.}$ des sols des PMA au-dessus des niveaux des sols de FNC. Cependant, ces augmentations dépendent des teneurs en ff des arénosols. L'ensemble des sols des PMA des deux groupes

d'arénoles a présenté des teneurs en P_{tot} supérieures à celles des sols des FNC, évoluant positivement avec la durée de mise en culture maraîchère intensive. La classification des arénoles selon la teneur en fraction fine peut servir de base à un programme d'utilisation de PRO. Les pratiques d'apports de PRO permettant des restitutions organiques peuvent être valorisées et divulguées.

La pédologie de la région de Dakar et les PRO qui y sont utilisés en culture maraîchère sont fortement diversifiés. Pour une agriculture intensive durable sur des arénoles conservés, des études ultérieures devraient aider à définir les associations de PRO à appliquer en fonction du type de sol.

Références

- Adhikari K. & Hartemink A. E., 2017. Soil organic carbon increases under intensive agriculture in the Central Sands, Wisconsin, USA. *Geoderma Regional*, 10, 115-125.
- Azeez J. O. & Van Averbeke W., 2010. Nitrogen mineralization potential of three animal manures applied on a sandy clay loam soil. *Bioresource technology*, 101(14), 5645-5651.
- Badiane Ndour N. Y., N'Dienor M., Akkal-Corfini N., Aubry C., Masse D., Paillat, J. M. & Tounkara S., 2016. *Péninsule de Dakar: recyclage en zone périurbaine*. In : Jarousseau Hélène (ed.), Houot Sabine (ed.), Paillat Jean-Marie (ed.), Saint Macary Hervé (ed.). Le recyclage des résidus organiques : regards sur une pratique agro-écologique. Versailles : Ed. Quae, p. 91-108.
- Bationo A. & Buerkert A., 2001. Soil organic carbon management for sustainable land use in Sudano-Sahelian West Africa. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 61(1-2), 131-142.
- Blanchard M., Coulibaly K., Bognini S., Dugué P. & Vall É., 2014. Diversity in the quality of organic manure produced on farms in West Africa: what impact on recommendations for the use of manure? *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 18(4), 512-523.
- Bot A. & Benites J., 2005. *The importance of soil organic matter: key to drought-resistant soil and sustained food production*. No. 80, FAO, Rome,
- Bunwaree S., 2000. Cités horticoles en sursis ? L'agriculture urbaine dans les grandes Niayes au Sénégal. Sous la direction de Safiétou Touré Fall et Abdou Salam Fall, CRDI. *Bulletin de l'APAD*, (20), 120 p.
- Calvet R., 2003. *Le sol : propriétés et fonctions*. Vol. 2, France, Agricole Editions.
- Chantigny M.H., P. Rochette & Angers D.A., 2001. Short-term C and N dynamics in a soil amended with pig slurry and barley straw: A field experiment. *Can. J. Soil Sci.*, 81, 131-137.
- Cotrufo M. F., Wallenstein M. D., Boot C. M., Deneff K. & Paul E., 2013. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biology*, 19(4), 988-995.
- De Nobili Á., Contin Á., Mondini C. & Brookes, P. C., 2001. Soil microbial biomass is triggered into activity by trace amounts of substrate. *Soil Biology and Biochemistry*, 33(9), 1163-1170.
- Deckers J., Driessen P., Nachtergaele F. & Spaargaren O., 2001. World reference base for soil resources—in a nutshell. *Soil Classification*, 173-181.
- Eigenberg R. A., Woodbury B. L., Ferguson R., Nienaber J. A. & Spiehs M. J., 2009. Use of alfalfa for soil phosphorus removal following long-term manure application. In 2009 Reno, Nevada, June 21-June 24, 2009 (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Fontaine S., Bardoux G., Abbadie L. & Mariotti A., 2004. Carbon input to soil may decrease soil carbon content. *Ecology letters*, 7(4), 314-320.
- Fontaine S., Mariotti A. & Abbadie, L., 2003. The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? *Soil Biology and Biochemistry*, 35(6), 837-843.
- Franks L. R., 2000. *Phosphorus Dynamics in Tennessee Soils Receiving Various Long-term Manure Applications*.
- Fujisaki K., Chevallier T., Chapuis-Lardy L., Albrecht A., Razafimbelo T., Masse D. & Chotte J. L., 2018. Soil carbon stock changes in tropical croplands are mainly driven by carbon inputs: a synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 259, 147-158.
- Hartemink A. E. & Hutting J., 2005. Sandy soils in Southern and Eastern Africa: extent, properties and management. Proc. Management of Tropical Sandy Soils for Sustainable Agriculture. *A Holistic Approach for Sustainable Development of Problem Soils in the Tropics*, 27, 148-158.
- Hartemink A.E. & Huting J., 2008. Land cover, extent, and properties of Arenosols in Southern Africa. *Arid Land Research and Management*, 22(2), 134-147.
- Hassink J., 1997. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and soil*, 191(1), 77-87.
- Hodmihou N. R., Feder F., Masse D., Agbossou K. E., Amadji G. L., Ndour-Badiane Y. & Doelsch E., 201. Diagnostic de contamination des agrosystèmes périurbains de Dakar par les éléments traces métalliques. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 20(3), 397-407.
- IUSS Working Group WRB, 2015. World reference base for soil resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports, 106 p.
- Kiba D. I., Zongo N. A., Lompo F., Jansa J., Compaore E., Sedogo P. M. & Frossard E., 2012. The diversity of fertilization practices affects soil and crop quality in

urban vegetable sites of Burkina Faso. *European journal of agronomy*, 38, 12-21.

Liao Y., Wu W. L., Meng F. Q., Smith P. & Lal R., 2014. Increase in soil organic carbon by agricultural intensification in northern China. *Biogeosciences Discussions*, 11(11), 16497-16525.

Maignien R., 1959. *Les sols de la presqu'île du Cap Vert*.

Mallory E. B. & Griffin T. S., 2007. Impacts of soil amendment history on nitrogen availability from manure and fertilizer. *Soil Science Society of America Journal*, 71(3), 964-973.

Mbaye A. & Moustier P., 2000. Market-oriented urban agricultural production in Dakar. Growing cities, growing food. *Urban agriculture on the policy agenda*, 235-256.

Müller C., Laughlin R. J., Christie P. & Watson C. J., 2011. Effects of repeated fertilizer and cattle slurry applications over 38 years on N dynamics in a temperate grassland soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(6), 1362-1371.

Murphey, J. & Riley, J. P., 1962. Phosphorus analysis procedure. *Methods of soil analysis. Part, 2*, 413-426.

Murty D., Kirschbaum M. U., Mcmurtrie R. E. & Mcgilvray H., 2002. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature. *Global Change Biology*, 8(2), 105-123.

N'Dayegamiye A. & Drapeau A., 2009. Influence de la nature des fertilisants apportés sur la dynamique de la structure et les teneurs en carbone et en substances humiques pour un loam argileux Sainte-Rosalie. *Agrosol*, 20(1), 15-22.

N'Dienor M., 2014. Recyclage des déchets urbains solides par l'agriculture urbaine à Dakar (Sénégal). *Pour*, (4), 299-314.

Niane-Badiane A., Ganry F. & Jacquin F., 1999. Changes in microbial biomass at the field level: its impact on the available amount of nitrogen in a tropical arenosol from Senegal. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Series IIA Earth and Planetary Science*, 1(328), 45-50.

Predotova M., Bischoff W. A. & Buerkert A., 2011. Mineral-nitrogen and phosphorus leaching from vegetable gardens in Niamey, Niger. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 174(1), 47-55.

Presley D. R., Ransom M. D., Kluitenberg G. J. & Finnell P. R., 2004. Effects of thirty years of irrigation on the genesis and morphology of two semiarid soils in Kansas. *Soil Science Society of America Journal*, 68(6), 1916-1926.

Shaddox T. W. & Sartain J. B., 2001. Fate of nitrogen during grow-in of a golf course fairway under different nitrogen management practices. *Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings*, 60, 59-63.

Sharpley A. N., Smith S. J. & Bain W. R., 1993. Nitrogen and phosphorus fate from long-term poultry litter applications to Oklahoma soils. *Soil Science Society of America Journal*, 57(4), 1131-1137.

Six J., Conant R. T., Paul E. A. & Paustian K., 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and soil*, 241(2), 155-176.

Slueter S., De Neve S., Singier B. & Hofman G., 2006. Organic C levels in intensively managed arable soils—long-term regional trends and characterization of fractions. *Soil use and management*, 22(2), 188-196.

Stumpe J. M. & Vlek P. L., 1991. Acidification induced by different nitrogen sources in columns of selected tropical soils. *Soil Science Society of America Journal*, 55(1), 145-151.

USDA NRCS, 2010. *Keys to soil taxonomy*. Soil Survey Staff. Washington.

Walkley A. & Black I. A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38.